

ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ РАЗРЯДА В СИСТЕМЕ ОЧИСТКИ ВХОДНОГО ЗЕРКАЛА ДИАГНОСТИКИ “АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ” РЕАКТОРА ИТЭР ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕРМОЭМИССИОННОГО КАТОДА

© 2022 г. А. В. Рогов^{a,b,*}, Ю. В. Капустин^{a,b}

^a Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

^b Частное учреждение “ИТЭР-Центр”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1, стр. 3

*e-mail: alex-rogov@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.01.2022 г.

После доработки 20.01.2022 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

Представлены результаты исследования предельных эксплуатационных режимов по давлению газа при использовании D_2 , He, Ne и Ar в системе плазменной очистки входного зеркала диагностики “Активная спектроскопия” реактора ИТЭР. Эксперименты проводились на полноразмерном функциональном макете системы очистки, основанной на разряде с сетчатым полым катодом, при заземлении всех катодных элементов разрядной ячейки, включая полноразмерный макет входного зеркала. Выявлено, что при использовании в качестве рабочих газов D_2 , He и Ne давление поджига при напряжении 750 В составляет примерно 60, 100 и 20 Па соответственно и значительно превышает максимально допустимое для ИТЭР в режиме очистки (7 Па). При этом давление гашения разряда в рассмотренных случаях ≤ 1 Па. Показано, что использование дополнительного термоэмиссионного катода, расположенного внутри разрядной ячейки, позволяет инициализировать разряд при давлениях, близких к давлению гашения. Включение термокатада с плавным нарастанием тока накала при отсутствии разрядного тока и его отключение после поджига разряда обеспечивают значительное увеличение ресурса термокатада. Применение всех доступных для использования в ИТЭР газов и радикальное снижение рабочего давления облегчает решение проблемы обезгаживания вакуумной камеры и диагностических портов термоядерных установок после проведения очистки зеркал, что позволяет снизить долю тяжелых примесей в дейтерий-третиевой смеси и, соответственно, повысить температуру плазмы во время рабочего импульса.

DOI: 10.31857/S003281622203017X

ВВЕДЕНИЕ

Одним из требований при разработке систем оптической диагностики плазмы международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР [1] является обеспечение периодического удаления загрязнений с отражающей поверхности входного зеркала. Для проведения этой процедуры в состав всех оптических диагностик должна входить встроенная система плазменной очистки зеркал и предусмотрен специальный режим работы установки с отключением магнитного поля и увеличением давления в вакуумной камере реактора с 10^{-4} Па в промежутках между рабочими импульсами до 0.1–7 Па в режиме плазменной очистки [2, 3]. В качестве рабочих газов допускается применение D_2 , He, Ne и Ar.

Система очистки первого зеркала разрабатываемой в России оптической диагностики “Ак-

тивная спектроскопия” (Charge exchange recombination spectroscopy – CXRS) основана на удалении токопроводящих и тонких диэлектрических загрязнений методом ионного распыления в разряде с осциллирующими электронами в сетчатом полом катоде на постоянном или среднечастотном импульсном токе (DC/PDC (direct current/pulsed direct current) система очистки). Для инициализации разряда на постоянном токе требуется давление, значительно превышающее давление гашения разряда. Как показали проведенные ранее эксперименты, применение Ar обеспечивает эффективное функционирование DC/PDC-системы очистки в заданном диапазоне давлений [4]. При этом давление зажигания примерно в двадцать раз превосходит давление, при котором происходит гашение разряда.

В диагностических портах ИТЭР, как правило, отсутствуют специальные подсистемы напуска

газа и вакуумной откачки, поэтому вся вакуумная камера установки, имеющая объем $\approx 1400 \text{ м}^3$ [1], будет заполняться газом до давления, необходимого для функционирования систем плазменной очистки зеркал. Все свободное внутреннее пространство диагностических портов заполнено блоками радиационной защиты из карбида бора с размерами $46 \times 46 \times 29.5 \text{ мм}$ [5]. Оценка площади поверхности, на которой происходит абсорбция газа, только для одного диагностического порта дает величину более 1000 м^2 [5], что уже превосходит площадь всей первой стенки (840 м^2). Большая часть этой поверхности находится в скрытых полостях между дополнительными блоками радиационной защиты. В этих условиях использование Ag при проведении очистки входных зеркал значительно усложняет процесс последующей дегазации внутривакуумных компонентов установки, необходимой для снижения поступления тяжелых примесей в дейтерий-тритиевую (DT) смесь в штатном режиме эксплуатации реактора. В связи с этим использование более легких газов (особенно D_2) в режиме очистки может оказаться предпочтительным.

Минимальное давление поджига самостоятельного газового разряда на постоянном токе зависит от потенциала ионизации используемого газа [6]. Чем он выше, тем больше давление, требуемое для поджига, при том же приложенном напряжении. Как показали проведенные ранее исследования на полноразмерном макете системы очистки диагностики “Активная спектроскопия” [4], инициализация разряда при использовании Ag происходит при давлении около 4 Па. Однако для разрядной конфигурации с заземленными элементами разрядной ячейки, использованной в этой диагностике, максимальная эффективность очистки достигается при более низком давлении. Потенциал ионизации D_2 , He и Ne значительно выше, чем у Ag, и для этих газов давление зажигания разряда значительно превосходит допустимое в ИТЭР (7 Па). Для снижения минимального давления газа, обеспечивающего повышение эффективности очистки на Ag и возможность применения He, He и D_2 , предлагается использовать вспомогательный накаливаемый катод, размещаемый внутри сетчатого полового катода.

В статье представлены результаты исследования влияния термоэлектронной эмиссии на инициализацию разряда в системе плазменной очистки входного зеркала диагностики “Активная спектроскопия” в случае использования схемы с заземленными катодными элементами разрядной ячейки (включая водоохлаждаемое входное зеркало), дополненной поджигающим устройством на основе накаливаемого катода.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Исследования проводились на вакуумном стенде МАВР-2, снабженном безмасляной системой откачки. Использовался изготовленный из молибдена в ЗАО “Солар” (г. Минск, Белоруссия) полноразмерный функциональный макет разрядной ячейки DC/PDC-системы очистки входного зеркала диагностики “Активная спектроскопия”. Геометрические размеры замкнутого коробчатого полового катода $150 \times 120 \times 250 \text{ мм}$. Характерный размер ячейки использованных секток – 5 мм. Съемная верхняя крышка полового катода (макет защитной поворотной шторки диагностического порта) не имеет перфорации. Диаметр дискового анода – 20 мм.

Катодные элементы разрядной ячейки были электрически соединены с заземленной вакуумной камерой. Расстояние от разрядной ячейки до стенок вакуумной камеры (на которых происходит осаждение продуктов эрозии, вышедших из разрядной ячейки через сетчатый катодный электрод) превышало 50 мм. Такая разрядная конфигурация не обеспечивает наилучшую эффективность очистки [4], но значительно упрощает конструкцию за счет возможности использования заземленного водоохлаждаемого входного зеркала. При этом не требуется применения электрической развязки в системе охлаждения и изоляторов для крепления элементов сетчатого полового катода, что повышает надежность функционирования в условиях термоядерного реактора. Общий вид разрядной ячейки (со снятой верхней крышкой) показан на рис. 1.

Принципиальная электрическая схема подключения компонентов разрядной ячейки и термоэмиссионного катода представлена на рис. 2.

Для эмиссии электронов при инициализации разряда применялся вольфрамовый термоэмиссионный катод с оксидным покрытием. Длина термокатаода 50 мм, диаметр нити накала $\approx 0.1 \text{ мм}$. Сопротивление в холодном состоянии $R = 1 \text{ Ом}$. Использовались два режима эмиссии электронов при поджиге разряда – с применением одного или двух параллельно включенных термокатодов. Применение переключателя K_1 позволило исследовать влияние эмиссии электронов с изолированного и электрически соединенного с полым катодом вспомогательного накаливаемого катода на инициализацию разряда при пониженном давлении рабочего газа, в качестве которого применялись D_2 , He, Ne и Ar.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Измерения зависимости давления зажигания от тока накала термокатаода для всех рабочих газов



Рис. 1. Фотография разрядной ячейки системы очистки первого зеркала диагностики “Активная спектроскопия”. 1 – макет входного зеркала; 2 – сетчатые стенки разрядной ячейки; 3 – анод; 4 – термоэмиссионный катод.

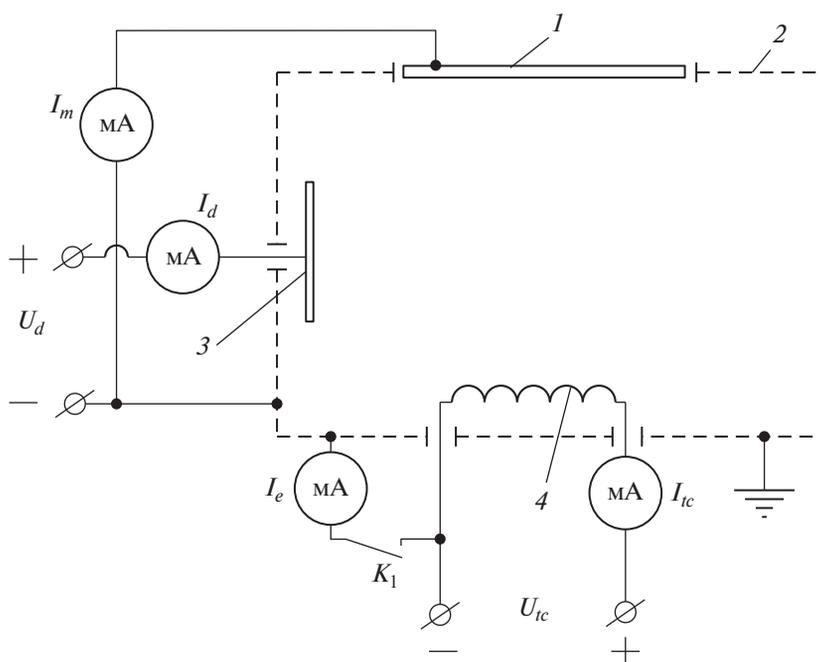


Рис. 2. Схема подключения разрядной ячейки и термоэмиссионного катода. 1 – макет входного зеркала, 2 – коробчатый сетчатый полый катод, 3 – анод, 4 – термоэмиссионный катод; K_1 – переключатель, I_m – ток распыляющих зеркало ионов, I_d – полный ток разряда, I_{tc} – ток накала термокатаода, I_e – ток эмиссии.

проводились в двух режимах – при использовании одного или двух термокатодов, включенных параллельно. Использовался режим стабилизации выходного тока источника питания разряда на уровне 200 мА. Напряжение в режиме холостого хода (без выходного тока) составляло 750 В. Ре-

зультаты измерений зависимости давления зажигания разряда от тока накала термокатаода для одного термокатаода представлены на рис. 3.

Дальнейшие исследования проводились при давлениях, близких к минимальному для используемого газа, при номинальном режиме термока-

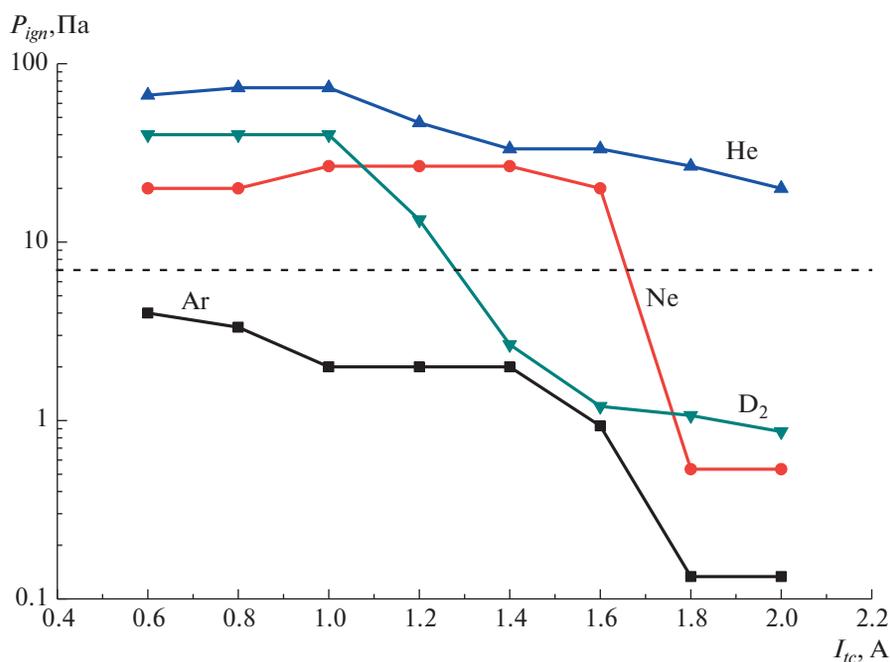


Рис. 3. Зависимости давления зажигания разряда (P_{ign}) от тока накала термокатода для D_2 , He, Ne и Ar при использовании одного термокатода.

тогда ($I_{ic} = 2$ А, $U_{ic} \approx 10$ В): $P_{D_2} = 6.7$ Па, $P_{He} = 6.7$ Па, $P_{Ne} = 2.7$ Па и $P_{Ar} = 0.5$ Па.

При подаче на термокатод напряжения $U_{ic} \geq 7$ В происходило его мгновенное перегорание. В режиме плавного нарастания тока накала до 10 В перегорания катода не наблюдалось. Это связано с различием сопротивления (в несколько раз) нити накала в холодном и нагретом состоянии.

На рис. 4 представлена зависимость напряжения при фиксированном токе разряда ($I_d = 200$ мА) от тока накала термокатода.

Отключение накала термокатода после инициализации разряда для всех исследованных газов приводило к переходу разряда в самостоятельный режим с повышением напряжения до нескольких сотен вольт.

Перераспределение ионного тока в полом катоде при наличии термоэмиссионного катода исследовалось посредством измерения зависимости тока разряда, поступающего на термокатод, от тока его накала при фиксированном значении полного тока разряда $I_d = 200$ мА. Полученная зависимость показана на рис. 5.

Влияние термоэмиссии на распыление поверхности зеркала (эффективность очистки) исследовалось посредством измерения зависимости ионного тока, поступающего на поверхность макета входного зеркала (I_m), от тока накала термокатода (I_{ic}). Результаты представлены на рис. 6.

Применение одного термокатода при использовании He не позволило снизить давление поджига до предельно допустимого в ИТЭР значения ($P_{max} = 7$ Па) [2]. Исследование зависимости давления зажигания для He от тока накала термокатода при повышенном значении максимального тока эмиссии электронов проводилось при применении двух параллельно включенных термокатодов. Зависимости давления зажигания от тока накала с использованием одного и двух параллельно включенных термокатодов показаны на рис. 7.

Как видно из полученных результатов, требуемый для инициализации газового разряда ток эмиссии электронов зависит от использованного газа и имеет наибольшее значение для He. Это связано с тем, что этот газ имеет максимальное значение потенциала ионизации. Результаты измерения давления поджига разряда на D_2 , He, Ne и Ar без термокатода и с его использованием в номинальном режиме, а также потенциалы ионизации для этих газов представлены в табл. 1.

Также был исследован режим с изолированным от полого катода термокатодом (K_1 — разомкнут, см. рис. 2). Такое включение практически не повлияло на давление зажигания и вольт-амперную характеристику разряда.

На основании полученных данных можно сделать заключение, что при включении термокатода, расположенного внутри полого катода и находящегося под его потенциалом, формируется сла-

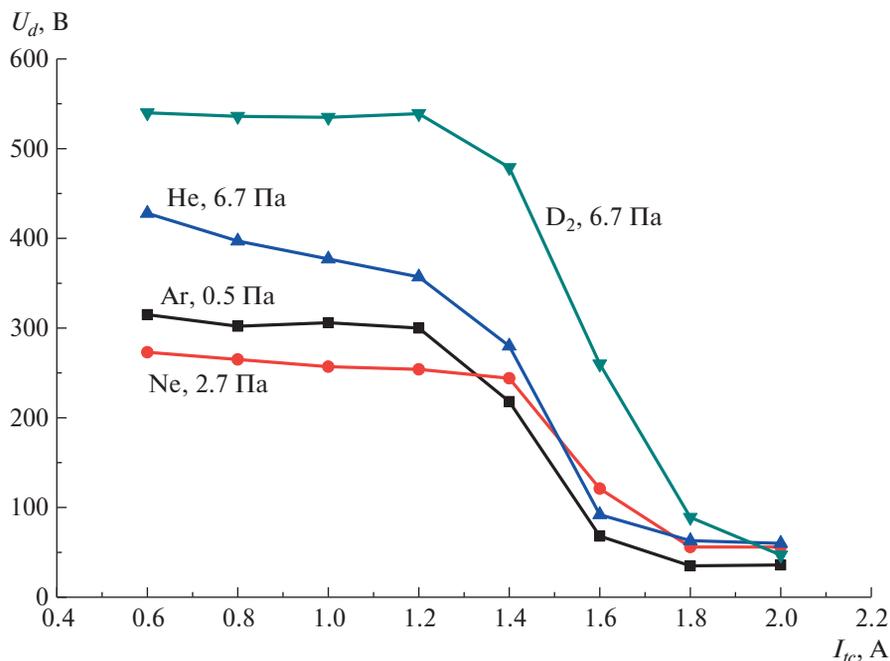


Рис. 4. Зависимости напряжения при фиксированном токе разряда $I_d = 200$ мА от тока накала термокатода при характерных для проведения очистки давлениях (цифры у кривых) D_2 , He, Ne и Ar.

боточный несамостоятельный тлеющий разряд с характерным током порядка 10 мА. Основной измеряемый ток переносится электронами непосредственно между накаливаемым термокатодом

и анодом. В пользу этого предположения свидетельствует то, что после зажигания газового разряда в режиме стабилизации тока при увеличении эмиссии электронов ток электронов (I_e), поступа-

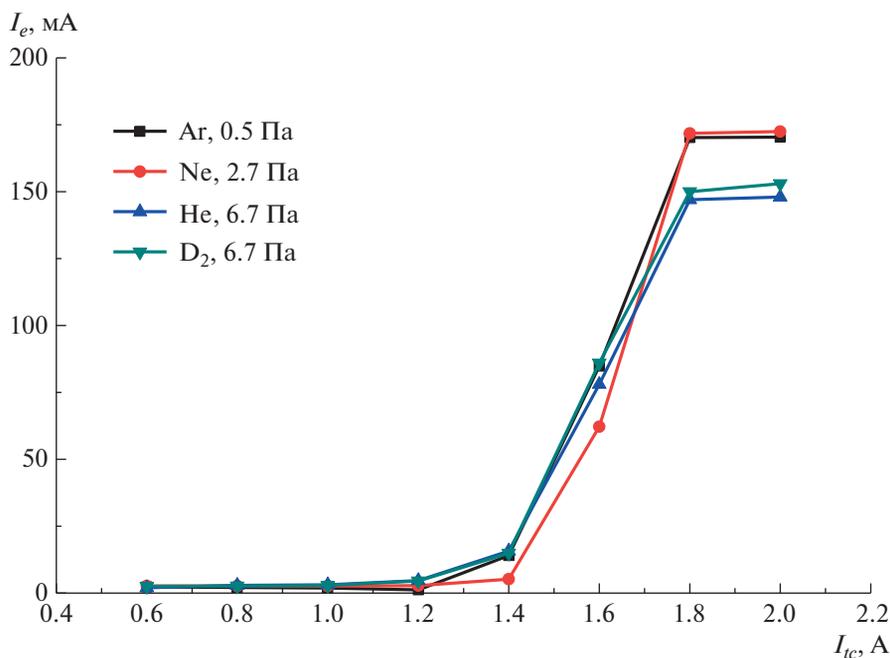


Рис. 5. Зависимости тока разряда, поступающего на термокатод, от тока его накала при фиксированном значении тока разряда $I_d = 200$ мА и характерных для проведения очистки давлениях D_2 , He, Ne и Ar.

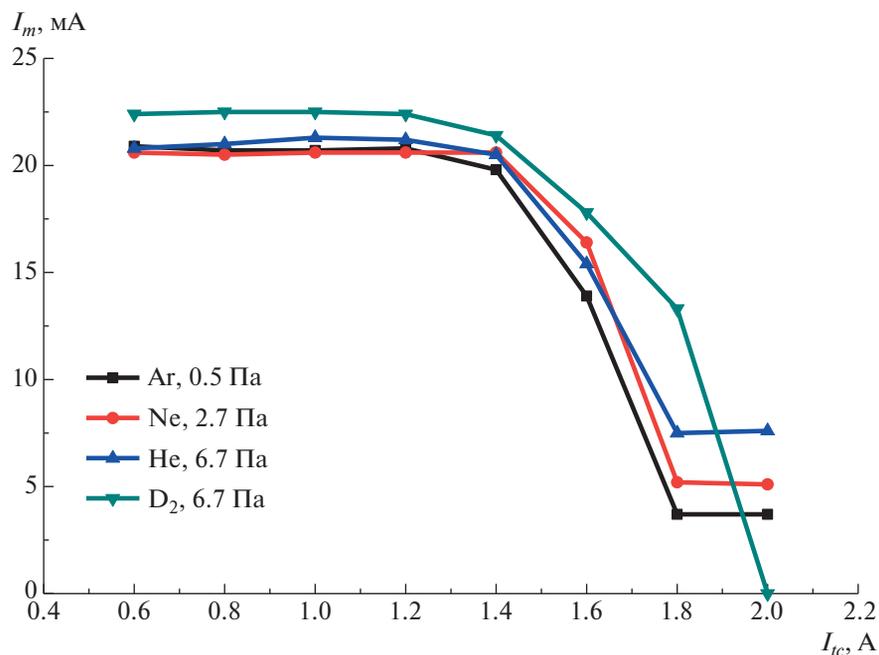


Рис. 6. Зависимости ионного тока, поступающего на поверхность макета входного зеркала, от тока накала термокатода при фиксированном значении тока разряда $I_d = 200$ мА и характерных для проведения очистки давлениях D₂, He, Ne и Ar.

ющий с термокатода, увеличивается, а ионный ток, вызывающий распыление внутренних стенок полого катода, уменьшается. При номинальном токе нагрева термокатода практически весь

ток проходит через термокатод, а напряжение разряда уменьшается с нескольких сотен до нескольких десятков вольт. При этом термокатод не перегорает, что имело бы место при большой

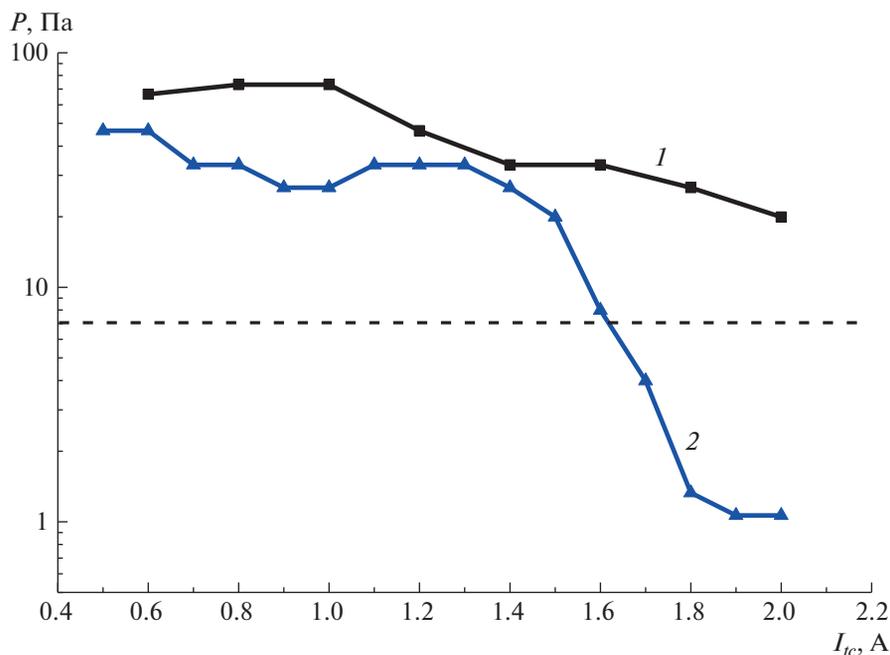


Рис. 7. Зависимости давления зажигания разряда на He от тока накала термокатода при использовании одного (1) и двух параллельно включенных (2) термокатодов.

Таблица 1. Давление зажигания и гашения чистящего разряда

Газ	Потенциал ионизации, эВ	Давление поджига разряда, Па			Давление гашения, Па
		без термокатода	с одним термокатодом ($I_{ic} = 2 \text{ А}, U_{ic} = 10 \text{ В}$)	с двумя термокатадами ($I_{ic} = 4 \text{ А}, U_{ic} = 10 \text{ В}$)	без термокатода
D ₂	13.6	40	0.9	0.8	0.7
He	24.6	67	20	1.1	0.8
Ne	21.6	20	0.6	0.5	0.4
Ar	15.8	4	0.1	0.1	0.2

ионной компоненте за счет распыления нити накала (измеренное значение толщины нити накала — 0.1 мм). Ресурс использованного в экспериментах термокатода в нагретом состоянии составил несколько десятков минут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения работоспособности системы поджига иницирующей разряд термокатод должен быть электрически соединен с сетчатым полым катодом разрядной ячейки системы очистки и располагаться внутри него. Поскольку вакуумная камера ИТЭР имеет значительный объем (1400 м³), быстрое изменение давления для обеспечения поджига разряда в одной из систем очисток, с учетом обеспечения их одновременной работы во всех оптических диагностиках, не представляется возможным. Использование термокатода для инициализации разряда в системе очистки диагностики ИТЭР “Активная спектроскопия” позволяет понизить давление поджига разряда до значений, близких к давлению гашения самостоятельного аномального тлеющего разряда. Это обеспечивает возможность применения в плазменной системе очистки диагностики “Активная спектроскопия” всех разрешенных газов — Ar, Ne, He и D₂. При использовании Ar уменьшение рабочего давления обеспечивает режим максимальной скорости удаления загрязнений (для земленной конфигурации разрядной ячейки системы очистки). Применение D₂ и He может обеспечить уменьшение доли тяжелых примесей в рабочей DT-смеси реактора ИТЭР. Ресурс поджигающего устройства можно значительно увеличить за счет применения термокатодов увели-

ченного диаметра, используя режим плавного нарастания тока накала на этапе инициализации и обеспечивая автоматическое его отключение сразу после поджига разряда.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке НИЦ “Курчатовский институт” (Приказ № 3026 от 25.11.2021 г.).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. URL: <https://www.iter.org/>
2. *Shigin P.* // 55.NM justification memo – vacuum conditions for mirror cleaning. Report. 2019. IDM UID: Y5QRZ2.
3. *Shigin P., Babinov N., De Temmerman G., Danisi A., Dmitriev A., Larsen J., Madsen R., Marot L., Moser L., Mukhin E., Kochergin M., Ortiz R., Razdobarin A., Reichle R., Pitts R., Samsonov D., Tsalas M., Udintsev V., Vayakis G., Walsh M.* // Fusion Engineering and Design. 2021. V. 164. 112162. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112162>
4. *Рогов А.В., Капустин Ю.В.* // ПТЭ. 2021. № 3. С. 60. <https://doi.org/10.31857/S0032816221030332>
5. *Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M., Polosatkin S., Klimenko M., Semenov A., Taskaev S., Kasatov D., Shehudlo I., Makarov A., Davydov N.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2000. V. 48. Is. 6. P. 1474. <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2937605>
6. *Лисовский В.А., Яковин С.Д.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 6. С. 58.